



TITLE:

Study on Application of Multi-Layer and Multi-Phase Theories to Earthquake Site Response(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Shingaki, Yoshikazu

CITATION:

Shingaki, Yoshikazu. Study on Application of Multi-Layer and Multi-Phase Theories to Earthquake Site Response. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20684>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	新垣 芳一
論文題目	Study on Application of Multi-Layer and Multi-Phase Theories to Earthquake Site Response (多層・多相理論を適用した表層地盤の地震応答特性に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>地下深くの活断層やプレートで発生した地震は、地表面に到達するまでに伝播する地盤の応答特性に依ってその強さが変化する．特に工学的基盤以浅の表層地盤の応答特性による地震動の増幅は家屋倒壊などの地震災害を引き起こす大きな要因の 1 つであり、2016 年熊本地震における益城町の甚大な被害の原因としても考えられている．地盤の応答特性は工学的に重要な問題であり、その評価にあたってこれまで数多くの研究が進められてきた．しかし、その多くは観測記録や被災事例に基づいた経験的な評価手法であり、必ずしも厳密な理論的背景を持つものではない．本論文は、Multi-layer theory (多層理論) と Multi-phase theory (多相理論) を用いて地盤の応答特性を評価するための基礎的な検討を行ったものである．</p> <p>第 1 章は序論である．過去の地震災害と地盤応答との関係や、現状の評価・推定方法を概括した上で、本論文で取り組む 3 つのテーマとして、工学的基盤以深の増幅特性、多層理論に基づいた表層地盤の増幅特性、多相理論に基づいた地盤の液状化解析法を提示している．</p> <p>第 2 章では、表層地盤の応答評価を行う際の入力として必要となる、工学的基盤波の評価方法を検討している．強震記録と地盤調査データより逆算した工学的基盤波の減衰 5%加速度応答スペクトルと既往の距離減衰式との比率を、地震基盤から工学的基盤までの地震波増幅に関する揺れやすさの指標とし、この指標を強震観測点ごとに評価して、その空間分布と地形・地質の分布を照らし合わせることで、対象の地域をゾーニングする．これにより強震観測を実施していない地点の指標を推定する手法を提案している．本章では、例題として富士山南東部地域を対象にゾーニング手法を提示し、5つのゾーンを設定することが妥当と結論づけている．</p> <p>第 3 章では、表層地盤の地震応答特性を多層理論に基づいて評価・検討している．現状では地盤応答特性を簡易に評価する際に、深度 30m までの平均 S 波速度 (V_{S30}) を用いた評価法が主に使われているが、経験則であるために理論的背景に乏しいという問題がある．本論文は多層理論の一つである Normalized Energy Density (Goto et al., 2011) の保存則に基づいて、最表層と基盤層の S 波インピーダンス比を用いた地盤応答評価方法の性能を、数値実験により検討している．4 層から成る仮想地盤をランダムに 10,000 モデル作成し、卓越周期が異なる 3 種類の入力波を用いて応答解析を実施した．入力波や伝達関数の周期特性に関係なく S 波インピーダンスが大きくなるにつれて増幅率が単調に小さくなること、また短周期成分が卓越した入力波の場合や、短周期成分の影響が大きい指標 (PGA 等) に対しては、S 波インピーダンスは V_{S30} よりも増幅率との相関が高く、深度 10m までの平均 S 波速度 (V_{S10}) と同程度の性能であることを確認している．</p> <p>第 4 章では、表層地盤が液状化した場合の応答解析法を、多相理論に基づいて議論している．Fujisawa et al. (2010) による内部侵食を考慮した飽和土 3 相モデルを液状化現象に適用する方法について、既往の研究を交えながら最初に述べている．Fujisawa et al. (2010) の支配方程式を液状化現象に適用するためには、以下の 5 点を修正する必要がある．(1) 応力の影響を考慮しない運動学の式である．(2) 地盤応答解析で</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	新垣 芳一
<p>はラグランジュ座標が一般的であるのに対し、オイラー座標の式である．(3) 土骨格の変形と破壊を考慮していない．(4) 有効応力の減少に伴う過剰間隙水圧を取り扱っていない．(5) 2次元のみを対象としている．(2)～(5)については、状態方程式を考慮したラグランジュ表現の3次元の質量保存則を導出することで修正し、ダイレイタンシーおよび間隙比の影響を考慮できる砂の弾塑性モデルを組み合わせることで、支配方程式を拡張している．一方、(1)については運動量保存則を導出する必要があるが、これについては今後の課題としている．また、土骨格相から浮遊土粒子相に流出する内部侵食の影響が大きいことを鑑み、間隙流体のミクロな流れを Hagen-Poiseuille 流れに置き換えることで、間隙流体によって土骨格に作用するせん断応力（摩擦応力）を導出し、侵食率の式に適用する方法を提案している．提案式は過剰間隙水圧、間隙比、土骨格の体積ひずみを変数としていることが特徴である．</p> <p>既往の弾塑性モデルでは、有効応力経路が変相線を越えた後に応力－ひずみ関係の履歴ループが定常化し、大ひずみを再現できない場合がある．これを解決するため多くのモデルでは、繰返し履歴を表す変数として累積塑性ひずみを導入し、経験的に塑性剛性の変化を表しているのに対し、本論文では内部侵食によりこの影響を表現することを試みている．豊浦砂の繰返し非排水中空ねじりせん断試験結果を再現するシミュレーションを実施したところ、内部侵食を考慮した飽和土3相モデルの結果は変相線を超えても履歴ループは定常化せず、せん断ひずみの増加を再現することができた．これは内部侵食により間隙比が増加して緩い砂の挙動に近づいたことと、内部侵食に伴う間隙流体圧の上昇に起因すると考えられる．ただし、せん断ひずみの増加速度は実験結果よりも大きい結果となった．本論文で使用した侵食率が内部侵食のみを対象とし、土粒子の目詰まりなどによる土骨格の再構成を考慮していないことによる可能性が考えられる．</p> <p>第5章は本論文で得られた成果について要約している．</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、多層理論および多相理論に基づいた地盤応答評価法に関する基礎的な研究を取りまとめたものであり、従来の経験則に基づいた評価法とは異なるアプローチを展開している。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 多層理論の一つである Normalized Energy Density の保存則に基づいて、最表層と基盤の S 波インピーダンス比に基づいた地震動指標の増幅率の評価法を提案した。広く用いられている平均 S 波速度と比較して、短周期成分の卓越する入力波の場合や、短周期が支配的な指標である PGA 等に対しては、よい相関が見られることが確認された。
2. 多相理論の一つである内部侵食を考慮した飽和土 3 相モデルに基づいて、地盤の液状化現象を表すモデルを提案した。既往の内部侵食モデルに対して、土骨格の変形とミクロな侵食による効果を考慮したモデルを新たに構築している。繰返し三軸試験の再現解析を実施したところ、内部侵食の効果により、有効応力経路が変相線を越えた後に応力-ひずみ関係の履歴ループが定常化せず、せん断ひずみの増加を再現している。

本論文は、最新の理論に立脚して表層地盤の地震応答特性の評価法を提案している点が優れている。設計実務においても設計外力を超過した場合の構造物の振る舞いについて検討する（危機耐性を考慮する）ことが求められつつあるが、十分な観測データが存在しない条件における評価を実施するには、既存の研究で用いられてきた経験則で対応することは困難である。本論文の成果は、このような条件においても適用可能な、理論に基づいた方法を提案しており、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年8月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規定第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

